

## ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ С СУПЕРКОНДЕНСАТОРНОЙ БАТАРЕЕЙ

В настоящее время большинство мировых автопроизводителей начали выпуск электромобилей и разрабатывают новые модели. По ряду оценок в ближайшие десятилетия ожидается значительный рост числа электромобилей [1]. В связи с этим на кафедре «АЭМС» НТУ «ХПИ» в 2011 году была открыта специализация «Компьютеризированные системы электромобилей» и создается учебно-лабораторный комплекс, одной из составляющих которого является электропривод (ЭП) с суперконденсаторной батареей, на базе автомобиля «Ланос».

Важным достоинством ЭП с батареей суперконденсаторов перед двигателями внутреннего сгорания является возможность создания тормозных усилий не за счет, сопровождающихся износом, тормозных колодок и дисков, а непосредственно электродвигателем (ЭД), который способен при этом преобразовать кинетическую энергию автомобиля в электрическую и возвращать (рекуперировать) ее суперконденсаторам. В городских условиях движения это позволяет обеспечить дополнительную существенную экономию энергоресурсов. Аккумуляторные батареи, способные принять мощность в рекуперативных режимах, слишком дороги для широкого использования, к тому же, возврат энергии в аккумуляторы при частых торможениях электромобиля в условиях городского цикла движения вызывает их ускоренный износ и старение [2]. Современные суперконденсаторы по сравнению с аккумуляторами имеют ряд важных достоинств:

- ресурс более 10 лет и более 300000...1000000 циклов «заряд-разряд»;
- высокая удельная мощность до 4...10 кВт/кг при КПД 95%;
- меньшая, по сравнению с аккумуляторами, зависимость характеристик от температуры.

Вышеуказанные достоинства СК обращают внимание создателей ЭП электротранспортных средств на использование СК в качестве накопителя электрической энергии [3]. В связи с трудностями приобретения суперконденсаторной батареи на номинальные параметры ЭП и предоставлением компанией «Юнаско-Украина» экспериментального образца суперконденсаторного модуля емкостью 200 Ф и максимальным напряжением 16,2 В была создана специальная лабораторная установка под параметры вышеуказанного модуля с сохранением схемы ЭП и законов управления.

Целью проведенных экспериментальных исследований является проверка работоспособности и правильности функционирования одного из вариантов ЭП и оценка энергоэффективности использования суперконденсаторов.

Лабораторная установка включает в себя ЭП постоянного тока на основе широтно-импульсного преобразователя (ШИП) (рисунок 1) с цифровой системой управления (СУ). В качестве источника энергии используется свинцово-кислотная аккумуляторная батарея (АБ) с номинальным напряжением 12,6 В. Для приема рекуперированной энергии во время торможения, а также уменьшения пульсаций тока аккумулятора, параллельно АБ подключена полученная батарея суперконденсаторов (БК). Предотвращение зарядных токов аккумулятора во время рекуперативного торможения и заряда БК достигается включением диода Д3. В качестве электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением (М) был использован автомобильный стартер с номинальным напряжением питания 12 В. Масса автомобиля моделировалась маховиком, соединенным с М через зубчатую передачу. СУ включает в себя контур управления током, определяющий требуемое напряжение якоря двигателя, и блок управления транзисторами, обеспечивающий их коммутацию в соответствии с требуемым напряжением якоря. Двигательный режим осуществляется коммутацией транзистора Т1. Когда он открыт, вследствие превышения напряжения БК над ЭДС якоря ток в якоре возрастает и индуктивность якорной цепи накапливает энергию  $W_1 = LI^2/2$ . После запираания Т1 ток продолжает протекать в том же направлении через якорь и диод Д2. Благодаря высокой частоте коммутации (14,4 кГц) ШИП возрастание и снижение тока за период коммутации Т1 незначительны, что не вызывает резких изменений момента двигателя. Для перехода в режим рекуперативного торможения осуществляется коммутация транзистора Т2, при этом Т1 закрыт. Когда Т2 открыт, под действием ЭДС якоря ток двигателя меняет свое направление с двигательного на генераторный, создавая тормозной момент. После запираания Т2 ток продолжает течь через диод Д1 в БК, заряжая ее.

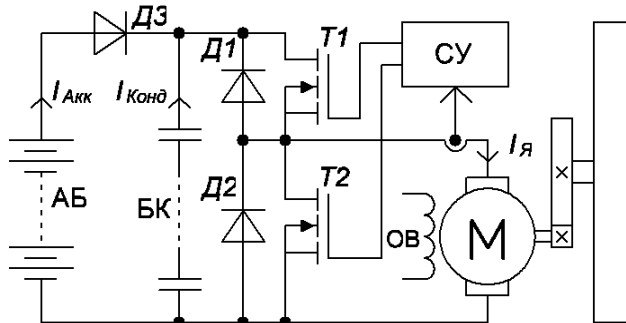


Рисунок 1 – Функциональная схема

Это сопровождается снижением кинетической энергии и переходом ее в электрическую энергию суперконденсаторной батареи. Повторное включение Т2 вновь сопровождается увеличением тормозного тока, а следующее за ним выключение повторяет цикл заряда БК, в течении которого изменение тока  $M$  находится в пределах  $(10...20)A$ , а средний тормозной момент определяется величиной среднего тока якоря. Управление моментом ЭД путем коммутации транзисторов Т1 и Т2 осуществляется СУ.

Экспериментальная оценка характеристик суперконденсаторного модуля производилась разрядом и зарядом модуля через транзистор на электролитический конденсатор емкостью 0,02 Ф. Временные диаграммы тока суперконденсаторного модуля ( $I$ ), изменения напряжения на нем ( $\Delta U$ ) и отношения мгновенных значений изменения напряжения к току ( $\Delta U/I$ ) представлены на рисунках 2 и 3, соответственно при кратковременных заряде и разряде. На первых микросекундах заметно влияние индуктивной составляющей цепи БК, вызывающее просадку напряжения на нем более 1 В. Далее, после 100 мкс,  $\Delta U/I$  снижается до 0,7 мВ/А при разряде и до 0,8 мВ/А при заряде, и остается на этом уровне в течение всего времени переходного процесса, что указывает на низкое внутреннее сопротивление суперконденсаторного модуля, менее 1 мОм. Время переходного процесса в суперконденсаторном модуле указывает на его незначительное влияние на быстродействие СУ.

На рисунке 4 представлены временные диаграммы гладкой составляющей тока якоря ЭД при скачкообразном сигнале задания. Фильтрация пульсаций тока от широтно-импульсной модуляции (ШИМ) произведена RC фильтром с постоянной времени 0,5 мс. Амплитуда пульсаций от работы ШИМ составляет 10...20А. Временная диаграмма подтверждает достаточное быстродействие и точность обработки заданного значения тока контуром тока управления ЭД электромобиля (время регулирования менее 5 мс, при этом перерегулирование не превышает 5 %).

Проверка функционирования схемы электропривода на соответствие технологическим этапам движения электромобиля подтвердила работоспособность схемы, обеспечение двигательных и тормозных режимов с рекуперацией энергии в БК. На рисунке 5 показаны ток якоря ( $I_{я}$ ) и напряжение БК ( $U_{БК}$ ) при разгоне маховика до 300 об/мин с питанием только от БК и последующим рекуперативным торможением, сопровождающимся возвратом энергии в БК и, соответственно, их зарядом. Во время разгона при токе якоря 110 А напряжение БК снижается с 15,5 В до 10,38 В, что соответствует расходу 13,28 кДж энергии. Во время торможения при токе якоря 70 А БК заряжается до 11,69 В, возвращается 2,89 кДж, то есть более 21% от затраченной энергии.

Как было указано выше, ШИМ вызывает пульсации тока через БК. На рисунках 6 и 7 показаны переменные составляющие тока ( $I_{БК ПС}$ ) через БК и напряжения ( $U_{БК ПС}$ ) на нем при разгоне и торможении соответственно. Амплитуда пульсаций тока составляет 6...8 А при разгоне и 3...5 А при торможении. Постоянная составляющая тока 50...100 А на графиках не показана. Высокочастотная составляющая тока, около 70 кГц, объясняется наличием LC контура, образованного БК, индуктивностью соединительных проводников и включенному параллельно блоку транзисторов конденсатору, защищающему транзисторы от перенапряжения при коммутации. Колебания напряжения на БК составляет 10...40 мВ, что не оказывает влияния на функционирование преобразователя.

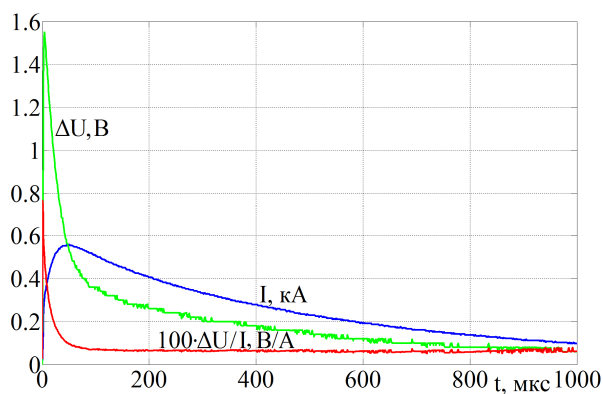


Рисунок 2 – Переходной процесс в БК при разряде

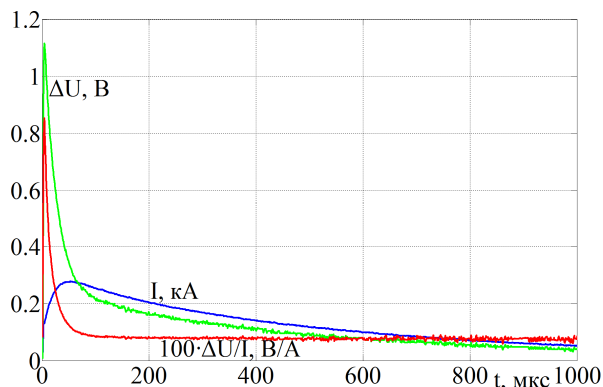


Рисунок 3 – Переходной процесс в БК при заряде

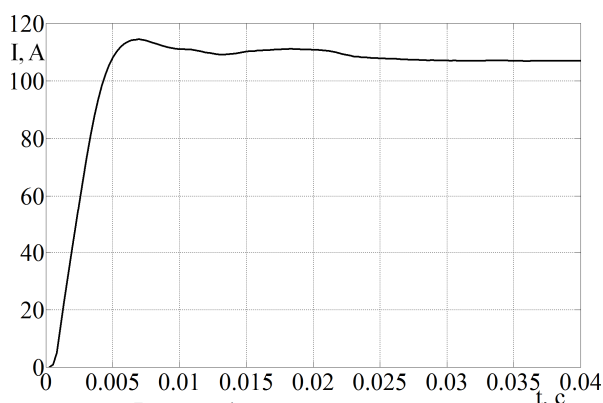


Рисунок 4 – Ток якоря при трогании

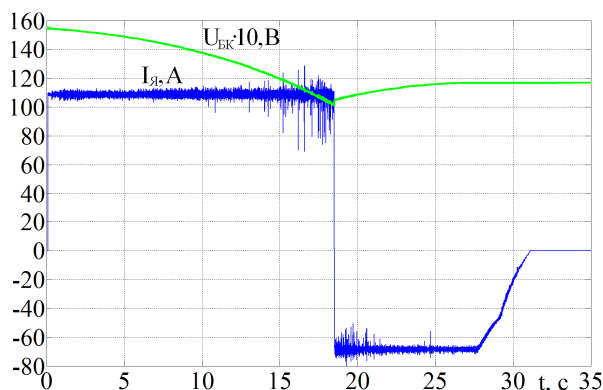


Рисунок 5 – Разгон и торможение

На рисунке 8 показаны значения отношения возвращаемой ( $W_{\text{Возвр}}$ ) во время торможения энергии к затрачиваемой ( $W_{\text{Затр}}$ ) во время разгона при различных значениях двигательного ( $I_d$ ) и генераторного ( $I_r$ ) токов якоря и начального напряжения БК ( $U_{\text{Нач}}$ ). Разброс значений связан с неточностью измерения напряжения БК, приводящей к абсолютной ошибке отношения около 0,01, однако видно увеличение эффективности при большем разрядном токе. Из зависимостей видно, что удастся возвращать 20...22 % от затраченной энергии.

Вышеуказанное значение существенно ниже ожидаемого в реальном ЭП электромобиля, так как использованный в экспериментах в качестве электрического двигателя стартёр имеет якорную цепь без дополнительных полюсов и несимметричное расположение щеток якоря, что вызывает перетоки энергии в якоре между парами щеток, вследствие чего при включенном возбуждении торможение с разомкнутой якорной цепью происходит в два раза быстрее, чем при выключенном возбуждении. Также падение напряжения на сопротивлении якорной цепи составляет 0,9 В при токе 100 А, что при ЭДС якоря 7 В при скорости маховика 300 об/мин составляет около 13%. Дополнительные потери создает механическая часть имеющая значительное трение (ток холостого хода составляет 19А). Как показывает компьютерное моделирование при номинальных параметрах ЭП, количество возвращаемой энергии будет существенно выше – (20...40)%. Из рисунка 5 видно, что в конце торможения, после 27 с, тормозной ток якоря становится меньше задаваемого. При этом рекуперация отсутствует, что связано с большими потерями в якорной цепи, вызывающими падение напряжения больше чем ЭДС якоря. Это приводит к непрерывно открытому состоянию транзистора Т2 и отсутствию тока заряда СК.

Выводы. Проведенные лабораторные исследования подтверждают работоспособность и рекуперацию энергии в рассматриваемой схеме электропривода для электромобиля, с использованием суперконденсаторов в качестве буферных накопителей рекуперированной электроэнергии в тормозных режимах. Даже при малом напряжении суперконденсаторного модуля и недостатках кинематических звеньев за счет возврата кинетической энергии экономилось более 20 % энергии затраченной на разгон. Для оценки полной энергоэффективности использования суперконденсаторов в ЭП электромобиля представляется целесообразным дополнить вышенаписанный эксперимент исследованиями с суперконденсаторной батареей на напряжение 120...140 В и емкостью 10...20 Ф.

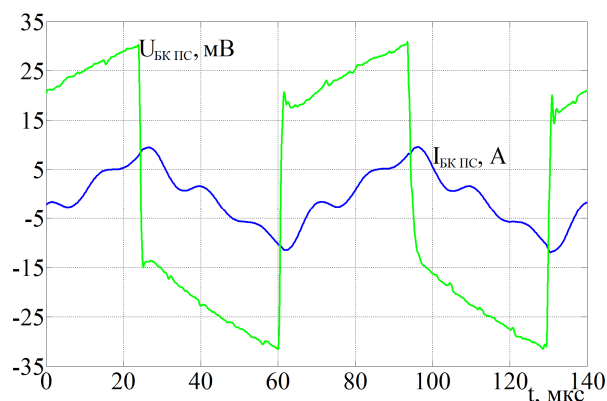


Рисунок 6 – Переменные составляющие тока и напряжения суперконденсаторов во время разгона

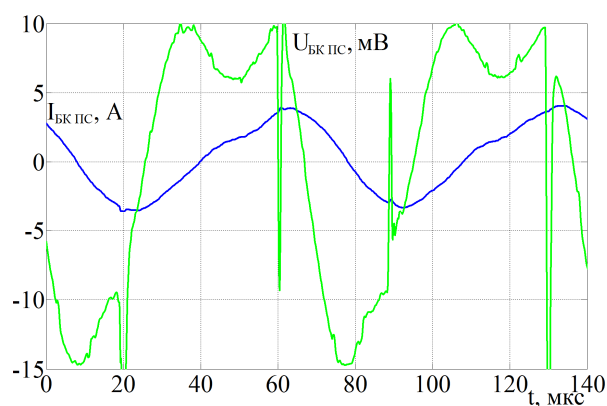


Рисунок 7 – Переменные составляющие тока и напряжения суперконденсаторов во время торможения

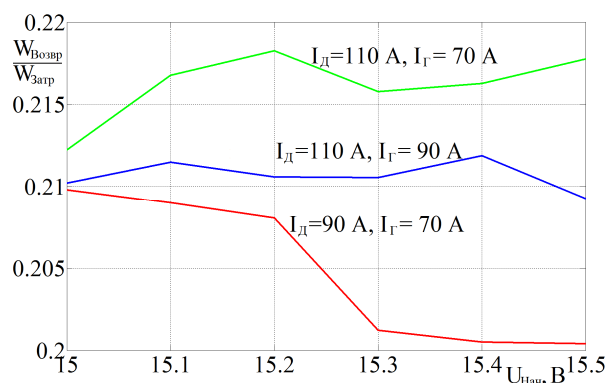


Рисунок 8 – Отношение возвращаемой к затрачиваемой энергии

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Fuhs Allen E. Hybrid vehicles and the future of personal transportation. – Taylor & Francis Group, 2009. – 471с.
2. J. Cao, A. Emadi, "A New Battery/UltraCapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles", IEEE Transactions on power electronics, vol. 27, no. 1, pp. 122-132, Jan. 2012.
3. Шидловский А.К., Павлов В.Б., Попов А.В. Применение суперконденсаторов в автономном аккумуляторном электротранспорте // Технічна електродинаміка. – 2008. – № 4. – С. 43–47.